

⑤

Int. Cl. 2:

H 01 L 41/10

⑱ BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND

DEUTSCHES PATENTAMT



DE 26 50 356 A 1

⑪

# Offenlegungsschrift 26 50 356

⑫

Aktenzeichen: P 26 50 356.0

⑬

Anmeldetag: 3. 11. 76

⑭

Offenlegungstag: 11. 5. 78

⑳

Unionspriorität:

⑳ ㉑ ㉒

⑤

Bezeichnung: Piezoelektrischer Ultraschallwandler zur Erzeugung von Rohrwellen

⑦

Anmelder: Battelle-Institut e.V., 6000 Frankfurt

⑧

Erfinder: Klot, Reinhold von, Dipl.-Phys. Dr., 6393 Wehrheim

DE 26 50 356 A 1

388-96/42/76

CASCH/DOJ

27. Oktober 1976

Patentansprüche

1. Piezoelektrischer Ultraschallwandler zur Erzeugung von Rohrwellen, dadurch gekennzeichnet, daß er aus einem piezoelektrischen Rohr (1) und nach dem Kammprinzip angeordneten ringförmigen Elektroden (2) besteht.
2. Piezoelektrischer Ultraschallwandler nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß das piezoelektrische Rohr (1) aus radial polarisierter Piezokeramik besteht.
3. Piezoelektrischer Ultraschallwandler nach Anspruch 1 und 2, dadurch gekennzeichnet, daß der Abstand zwischen zwei gleichphasigen Elektrodenringen ( 6 und 7) eine Wellenlänge beträgt und daß die Breite der Elektrodenringe vorzugsweise gleich dem Abstand zwischen zwei benachbarten Elektrodenringen ist und eine viertel Wellenlänge beträgt.
4. Piezoelektrischer Ultraschallwandler nach Anspruch 1 bis 3. dadurch gekennzeichnet, daß zur Erzeugung von longitudinalen Rohrwellen die ringförmigen Elektroden (2) senkrecht zur

Achse des piezoelektrischen Rohres (1) verlaufen.

5. Piezoelektrischer Ultraschallwandler nach Anspruch 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, daß zur Erzeugung von spiralförmig umlaufenden Rohrwellen die ringförmigen Elektroden (2) schräg zur Achse des piezoelektrischen Rohres (1) verlaufen.
6. Piezoelektrischer Ultraschallwandler nach Anspruch 1 bis 5, dadurch gekennzeichnet, daß die ringförmigen Elektroden (2) auf der äußeren und/oder inneren Oberfläche des piezoelektrischen Rohres (1) aufgebracht sind.
7. Piezoelektrischer Ultraschallwandler nach Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, daß zur Erhöhung der Modenselektivität für den Fall zweier Elektrodenanordnungen diese in axialer Richtung entweder um eine halbe Wellenlänge gegeneinander verschoben oder bezüglich der Wandung des piezoelektrischen Rohres (1) genau gegenüberliegend angeordnet sind.
8. Piezoelektrischer Ultraschallwandler nach Anspruch 1 bis 7, dadurch gekennzeichnet, daß die gleichphasigen Elektrodenringe jeweils durch eine elektrisch leitende Verbindung (4,5), welche bezüglich des piezoelektrischen Rohres (1) gegenüberliegend angeordnet sind, miteinander verbunden sind.
9. Piezoelektrischer Ultraschallwandler nach Anspruch 1 bis 8, dadurch gekennzeichnet, daß die Länge des piezoelektrischen

Rohres (1) eine ganze Anzahl von halben Wellenlängen beträgt.

10. Verfahren zum Nachweis von Längs- und Querfehlern sowie von Wandschwächungen von dünnwandigen Rohren, dadurch gekennzeichnet, daß der piezoelektrische Ultraschallwandler nach Anspruch 1 bis 9 in das zu prüfende Rohr hinein oder über das Rohr geschoben wird und die Fehler nach dem Impulsecho- oder Durchschallungsverfahren festgestellt werden.
11. Verfahren nach Anspruch 10, dadurch gekennzeichnet, daß jeweils ein piezoelektrischer Ultraschallwandler gleichzeitig in das zu prüfende Rohr hinein und über das Rohr geschoben wird.
12. Verfahren nach Anspruch 11, dadurch gekennzeichnet, daß zur Erhöhung der Modenselektivität die beiden Ultraschallwandler in axialer Richtung entweder um eine halbe Wellenlänge gegeneinander verschoben oder bezüglich der Rohrwandung (3) genau gegenüberliegend angeordnet werden.
13. Verfahren nach Anspruch 8 bis 12, dadurch gekennzeichnet, daß zur Erzielung gleicher Phasengeschwindigkeiten der angeregten Rohrwellen im piezoelektrischen Rohr und im zu prüfenden Rohr (Spuranpassung) ein piezoelektrischer Ultraschallwandler verwendet wird, bei dem das piezoelektrische Rohr eine geeignete Wanddicke aufweist.

14. Verfahren nach Anspruch 8 bis 13, dadurch gekennzeichnet, daß für den Nachweis von Wandschwächungen zur Erzielung einer starken Abhängigkeit der Gruppengeschwindigkeit der angeregten Rohrwelle von der Wandstärke des zu prüfenden Rohres ein piezoelektrischer Ultraschallwandler verwendet wird, der einen geeigneten Abstand zwischen zwei gleichphasigen Elektrodenringen aufweist.

2650356

5

388-96/42/76

CASCH/DOJ

27. Oktober 1976

BATTELLE - INSTITUT E.V., Frankfurt (Main)

=====

Piezoelektrischer Ultraschallwandler  
zur Erzeugung von Rohrwellen

=====

Die Erfindung betrifft einen piezoelektrischen Ultraschallwandler zur Erzeugung von Rohrwellen in dünnwandigen Rohren. Sie betrifft ferner ein Verfahren zum Nachweis von Längs- und Querfehlern sowie von Wandschwächungen in dünnwandigen Rohren mittels Rohrwellen, die durch den erfindungsgemäßen Ultraschallwandler, dessen Elektroden nach dem Kammprinzip angeordnet sind, erzeugt werden.

- 2 -

809819/0213

Es ist bereits bekannt, zur Prüfung dünnwandiger Rohre Ultraschall-Rotationsanlagen zu verwenden (K. Lorenz, "Zerstörungsfreie Prüfungen als Grundlage für die Abnahme", Vortragstagung der Deutschen Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e.V., Lahnstein, 24./26. Mai 1976). Bei diesen Anlagen rotieren mehrere Ultraschallköpfe um das Rohr, das in axialer Richtung verschoben wird. Die Ultraschall-Rotationsanlagen haben jedoch den Nachteil, daß bei der Prüfung einer großen Anzahl langer Rohre ein hoher Zeitaufwand erforderlich ist. Mit diesen Anlagen können auch nur gerade Rohre untersucht werden. Eingebaute Rohre können mit diesen Anlagen überhaupt nicht geprüft werden.

Zur Erzeugung von Rohrwellen ist ferner ein elektrodynamischer Ultraschallwandler bekannt, mit dem die Rohre von den Enden aus nach der Impulsecho-Technik geprüft werden können (W. Mohr, "Zur Prüfung dünnwandiger Rohre auf Quer- und Längsfehler mit geführten Wellen", Reaktortagung des Deutschen Atomforums e.V., Düsseldorf, 30. März/2. April 1976, S. 671-674). Mit dem elektrodynamischen Ultraschallwandler können in sehr kurzer Zeit, d.h. in der Laufzeit des Ultraschallimpulses entlang des Rohres hin und zurück, sowohl gerade als auch gebogene Rohre geprüft werden. Ein wesentlicher Nachteil des elektrodynamischen Wandlers besteht jedoch darin, daß der Frequenzbereich und damit auch die maximale Auflösung begrenzt sind. Die obere Frequenzgrenze liegt bei etwa 1 MHz. Ferner benötigt der elektrodynamische Ultraschallwandler für die Prüfung eingebauter Rohre, die nur von

innen zugänglich sind, -z.B. <sup>der</sup> ca. 10.000 Dampferzeugerrohre eines Kernkraftwerks vom Typ eines Druckwasserreaktors- eine Magnetisierung vom Innern der Rohre aus, was technisch aufwendig ist. Es ergeben sich wegen zu hohen Magnetfeldstärken Kühlprobleme und elektrische Einstreuungen von der Impulsmagnetisierung.

Ferner sind bereits ebene Ultraschallwandler bekannt, deren Elektroden nach dem Kammprinzip angeordnet sind (R.M. White, S.W. Voltmer, "Direct piezoelectric coupling to surface elastic waves", Applied Physics Letters, 7 (1965), S. 314-316). Diese ebenen Ultraschallwandler haben jedoch den Nachteil, daß mit ihnen Oberflächenwellen, aber keine Rohrwellen erzeugt werden können.

Die Aufgabe der vorliegenden Erfindung ist nun, einen Ultraschallwandler zur Erzeugung von Rohrwellen zu entwickeln, der sich für die Prüfung dünnwandiger Rohre, vorzugsweise Rohre mit einer Wanddicke von  $d \leq 5$  mm, eignet, einen einfachen technischen Aufbau besitzt und dessen Frequenzbereich sich nicht nur auf den kHz-Bereich, sondern auch auf den MHz-Bereich erstreckt. Eine weitere Aufgabe der vorliegenden Erfindung besteht darin, ein Verfahren zum Nachweis von Längs- und Querfehlern sowie von Wandschwächungen in dünnwandigen Rohren zu schaffen, das unter Verwendung des erfindungsgemäßen Ultraschallwandlers einfacher und wirksamer durchführbar ist.



Diese Aufgabe wird dadurch gelöst, daß der piezoelektrische Ultraschallwandler aus einem piezoelektrischen Rohr und nach dem Kammprinzip angeordneten ringförmigen Elektroden besteht.

Vorzugsweise wird das piezoelektrische Rohr aus radial polarisierter Piezokeramik hergestellt. Die ringförmigen Elektroden können sich sowohl auf der äußeren als auch auf der inneren Oberfläche des piezoelektrischen Rohres befinden. Das piezoelektrische Rohr kann aber auch auf beiden Oberflächen mit Elektroden versehen sein. In diesem Fall werden zur Erhöhung der Modenselektivität beide Elektrodenanordnungen in axialer Richtung entweder um eine halbe Wellenlänge gegeneinander verschoben oder genau gegenüberliegend angeordnet.

Der Abstand zwischen zwei gleichphasigen Elektrodenringen beträgt eine Wellenlänge. Die Breite der Elektrodenringe ist vorzugsweise gleich dem Abstand zwischen zwei benachbarten Elektrodenringen und beträgt eine viertel Wellenlänge.

Zur Verwirklichung des Kammprinzips sind zwei elektrisch leitende Verbindungen vorgesehen, die jeweils die gleichphasigen Elektrodenringe miteinander verbinden. Diese Verbindungen verlaufen in axialer Richtung und sind vorzugsweise im Hinblick auf das piezoelektrische Rohr gegenüberliegend angeordnet. Die Elektroden werden mit einer dünnen Isolationsschicht überzogen, welche diese elektrisch isoliert und zugleich mechanisch schützt.

Die Bandbreite und Richtcharakteristik des Ultraschallwandlers wird durch die Anzahl der Elektrodenpaare, d.h. durch die Länge der Elektrodenanordnung, bestimmt.

Die Resonanzfrequenz  $f_0$  der einzelnen Elektrodenpaare hängt von dem Abstand zwischen zwei gleichphasigen Elektrodenringen sowie von der Wanddicke und dem Durchmesser des piezokeramischen Rohres ab.

Zur Erzeugung von longitudinalen oder spiralförmig umlaufenden Rohrwellen ist der Winkel zwischen den ringförmigen Elektroden und der Achse des piezoelektrischen Rohres entscheidend. Zur Erzeugung von longitudinalen Rohrwellen, die insbesondere zum Nachweis von Querfehlern und von Wandschwächungen geeignet sind, verlaufen die ringförmigen Elektroden senkrecht zur Achse des piezoelektrischen Rohres. Sollen jedoch Längsfehler aufgefunden werden, so müssen die ringförmigen Elektroden zur Erzeugung von spiralförmig umlaufenden Rohrwellen schräg zur Achse des piezoelektrischen Rohres verlaufen.

Die Länge des piezoelektrischen Rohres muß eine ganze Zahl von halben Wellenlängen betragen, damit die Resonanzfrequenz des gesamten Rohres mit der Resonanzfrequenz der einzelnen Elektrodenpaare zusammenfällt. Das piezokeramische Rohr ist deshalb an seinen beiden Enden um eine achte Wellenlänge länger als die ganze Elektrodenanordnung.

Die Wanddicke des piezokeramischen Rohres muß so dimensioniert werden, daß die Phasengeschwindigkeit der angeregten Rohrwelle im piezokeramischen Rohr gleich der Phasengeschwindigkeit der Rohrwelle in dem zu prüfenden Rohr ist. Durch diese Spuranpassung werden die Empfindlichkeit und Modenselektivität des Wandlers optimiert. Da nach dem Rohrwellendiagramm (A.E. Armenakas, D.C. Gazis, G. Herrmann, "Free vibrations of circular cylindrical shells", Pergamon Press, Oxford 1969) die Phasengeschwindigkeit von Rohrwellen eine Funktion des Verhältnisses von Wanddicke zu Wellenlänge ist, kann bei vorgegebener Wellenlänge die Wanddicke des piezokeramischen Rohres so dimensioniert werden, daß eine Spuranpassung erreicht wird.

Zur Durchführung des Verfahrens für den Nachweis von Längs- und Querfehlern sowie von Wandschwächungen in dünnwandigen Rohren wird der piezoelektrische Ultraschallwandler in das zu prüfende Rohr hinein oder über das Rohr geschoben. Es können auch zwei Ultraschallwandler gleichzeitig verwendet werden, die entsprechend ihrer Durchmesser innerhalb und außerhalb des zu prüfenden Rohres angebracht werden. In diesem Fall werden zur Erhöhung der Modenselektivität beide Ultraschallwandler in axialer Richtung entweder um eine halbe Wellenlänge gegeneinander verschoben oder bezüglich der Rohrwandung genau gegenüberliegend angeordnet. Die nachzuweisenden Fehler werden nach dem Impulsecho- oder Durchschallungsverfahren festgestellt.

Wandschwächungen des zu prüfenden Rohres können an der Laufzeit-  
änderung der Rohrwellenimpulse festgestellt werden. Dazu muß ein  
Ultraschallwandler verwendet werden, der zwischen den gleich-  
phasigen Elektrodenringen einen solchen Abstand aufweist, d.h.  
es muß eine solche Wellenlänge gewählt werden, bei der die  
Gruppengeschwindigkeit der angeregten Rohrwellen eine starke Ab-  
hängigkeit von der Wandstärke des zu prüfenden Rohres aufweist.  
Da die Gruppengeschwindigkeit von Rohrwellen eine Funktion des  
Verhältnisses <sup>von</sup> Wanddicke zu Wellenlänge ist und es Bereiche mit  
starker und schwacher Abhängigkeit gibt, kann bei vorgegebener  
Wanddicke des zu prüfenden Rohres ein solcher Abstand zwischen  
den gleichphasigen Elektrodenringen gewählt werden, daß die ge-  
wünschte starke Abhängigkeit erreicht wird.

Beim Anlegen einer elektrischen Spannung an die Elektroden wer-  
den in dem piezokeramischen Rohr in axialer Richtung räumlich  
periodische, elektrische Felder erzeugt. Diese bewirken eine  
radiale Auslenkung der einzelnen Volumenelemente des piezokera-  
mischen Rohres mit der gleichen Periodizität. Die radiale Teil-  
chenauslenkung des Ultraschallwandlers wird mittels einer An-  
kopplungsflüssigkeit auf das zu prüfende Rohr übertragen. Dabei  
werden in dem zu prüfenden Rohr je nach dem Verlauf der kamm-  
artigen Elektroden entweder longitudinale oder spiralförmig  
umlaufende Rohrwellen abgestrahlt.

In den beiliegenden Zeichnungen wird der erfindungsgemäße piezo-  
elektrische Ultraschallwandler näher erläutert.

Figur 1 zeigt eine bevorzugte Ausführungsform des erfindungsgemäßen piezoelektrischen Ultraschallwandlers und ein zu prüfendes Rohr 3. Der erfindungsgemäße Ultraschallwandler ist rohrförmig ausgebildet und besteht aus einem piezoelektrischen Rohr 1 und ringförmigen Elektroden 2, welche in diesem Fall senkrecht zur Rohrachse verlaufen und auf der äußeren Oberfläche des piezoelektrischen Rohres aufgebracht sind. Der Durchmesser des piezoelektrischen Rohres ist in diesem Fall so dimensioniert worden, daß der Ultraschallwandler in das zu prüfende Rohr hineingeschoben werden kann.

Die Länge l des piezokeramischen Rohres 1 beträgt eine ganze Anzahl von halben Wellenlängen  $\lambda/2$  und ist an seinen beiden Enden 10 und 11 um  $\lambda/8$  länger als die ganze Elektrodenanordnung.

In Figur 2 wird die Abwicklung der kammartigen, ringförmigen Elektroden gezeigt, für den Fall, daß diese senkrecht zur Rohrachse verlaufen. Die jeweils gleichphasigen Elektrodenringe, z.B. 6 und 7, sind durch eine elektrisch leitende Verbindung 4 miteinander verbunden und am Ort der Verbindungsleitung 5 der andersphasigen Elektrodenringe unterbrochen.

Der Abstand zwischen zwei gleichphasigen Elektrodenringen, z.B. 6 und 7, beträgt eine Wellenlänge  $\lambda$ . Die Breite eines Elektrodenrings b ist gleich dem Abstand zwischen zwei benachbarten Elektrodenringen und beträgt  $\lambda/4$ .

Zur Erzeugung von elektrischen Feldern, die in axialer Richtung räumlich periodisch sind, in dem piezokeramischen Rohr, wird an die Elektroden 8 und 9 eine elektrische Spannung angelegt.

Der erfindungsgemäße Ultraschallwandler hat einen technisch einfachen Aufbau und ist daher in der Herstellung wirtschaftlich. Dies ist insbesondere dann wesentlich, wenn eingebaute austenitische Rohre, z.B. die Dampferzeugerrohre eines Kernkraftwerks vom Typ eines Druckwasserreaktors, geprüft werden müssen, die nur noch von innen zugänglich sind. Ferner kann mit dem erfindungsgemäßen Ultraschallwandler nicht nur im kHz-Bereich, sondern auch im MHz-Bereich gearbeitet werden. Dadurch ist sein Auflösungsvermögen wesentlich größer als z.B. das des elektrodynamischen Ultraschallwandlers, und es können kleinere Fehler empfindlicher nachgewiesen werden.

In den nachfolgenden Tabellen 1 und 2 werden die für die Prüfung von Dampferzeugerrohren mit einem Außendurchmesser von 22 mm und einer Wanddicke von 1,2 mm mit den longitudinalen Rohrwellen  $L(0,1)$  und  $L(0,2)$  jeweils geeigneten Längen  $l$  des erfindungsgemäßen piezoelektrischen Ultraschallwandlers und Wellenlängen  $\lambda$  zusammengestellt, welche gemäß den Beziehungen  $l=(n+1/2) \cdot \lambda$  und  $\lambda = v_{ph}/f_0$  zu bestimmen sind, wobei  $n$  die Anzahl der Wellenlängen,  $v_{ph}$  die Phasengeschwindigkeit und  $f_0$  die Resonanzfrequenz ist.

Tabelle 1

Prüfung mit der longitudinalen Rohrwelle L(0,1)

$f_0$ (MHz)	$\lambda$ (mm)	n	l (mm)
0,5	4,00	10	42,0
1	2,45	10	25,7
2	1,33	10	14,0
3	0,92	10	9,7
3	0,92	20	18,9

Tabelle 2

Prüfung mit der longitudinalen Rohrwelle L(0,2)

$f_0$ (MHz)	$\lambda$ (mm)	n	l (mm)
0,5	10,9	10	114,5
1	5,00	10	52,5
2	1,82	10	19,1
3	1,00	10	10,5
3	1,00	20	20,5

. 17 -  
2650356

Nummer:  
Int. Cl. 2:  
Anmeldetag:  
Offenlegungstag:

26 50 356  
H 01 L 41/10  
3. November 1976  
11. Mai 1978

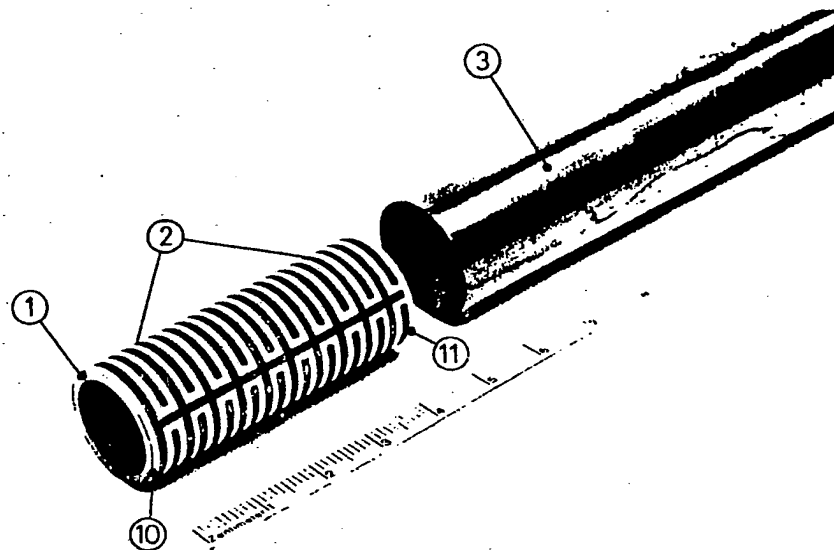


Fig.: 1

809819/0213



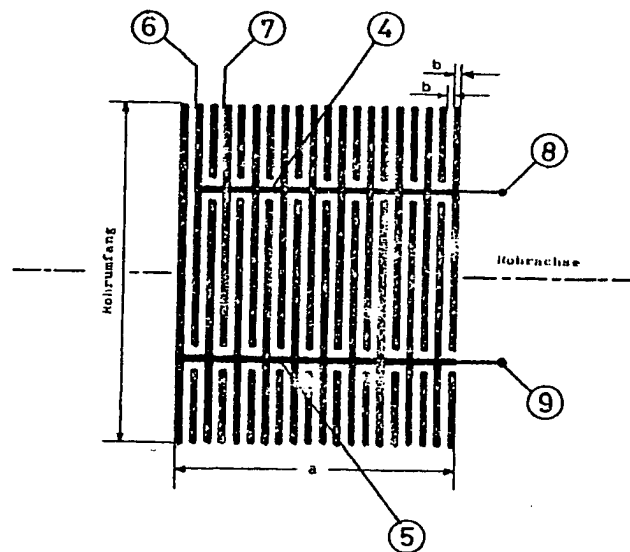


Fig.: 2

## CLAIMS - DE OS 26 50 356

1. A piezoelectric ultrasonic transformer for providing waves in pipes,  
characterised in that it consists of a piezoelectric pipe (1) and circular electrodes  
5 (2) arranged according to the comb principle.
2. A piezoelectric ultrasonic transformer according to claim 1, characterised in  
that the piezoelectric pipe (1) consists of radially polarised piezoceramic material.
- 10 3. A piezoelectric ultrasonic transformer according to claim 1 and 2,  
characterised in that the distance between two circular electrodes being in phase  
(6 and 7) is one wavelength and in that the width of the circular electrodes is  
preferably equal to the distance between two neighbouring circular electrodes and  
to one fourth of a wavelength.